京都工芸繊維大学

氏　　名	おおたに　あきお **大　谷　章　夫**
学位(専攻分野)	博　士（学術）
学位記番号	博甲第　５１４　号
学位授与の日付	平成 20 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 3 条第 3 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科　先端ファイブロ科学専攻
学位論文題目	**組物および組物複合材料円筒の内部構造と力学的特性に関する研究**
審査委員	(主査)教授　濱田泰以 教授　木村照夫 教授　鋤柄佐千子 准教授　仲井朝美

論文内容の要旨

組物強化複合材料は、繊維束が連続して配向しているため、優れた力学的特性を有し、かつ繊維束の配向角度を自由に変更できるため、要求性能に応じた複合材料構造が設計可能である。また、複雑な構造部材を、繊維束を切断することなく作製することができるため、自動車部材など様々な産業分野における構造部材としての使用が期待されている。しかしながら、組物の内部構造を決定するパラメータ(内部構造パラメータと呼ぶ)として繊維配向角度(組角度)、繊維束間距離、繊維束断面形状、繊維束断面積が存在し、それらがそれぞれ独立した値ではなく、相互に影響を及ぼしあう。これらのパラメータが決定することで組物複合材料の寸法が決定し、組物複合材料の構造物としての特性が決定される。しかしながら、上記パラメータの相互関係が明らかではなく、組物複合材料の寸法設計、構造設計が難しいという問題点を有する。そこで本論文では、円筒形状を有する炭素繊維強化組物複合材料の内部構造パラメータを定量化し、それら内部構造と力学的特性との関係を明らかにすることで、寸法設計、構造設計の指針を得ることを目的とした。

組物は斜めの繊維と長手方向の繊維により構成され、組物の斜めの繊維を「組糸」、長手方向の繊維を「中央糸」と呼ぶ。組糸だけで組物を構成することができ、中央糸は必要に応じて組みこむことができる。組物複合材料は、この組物に樹脂を含浸することにより作製されるが、組物は、引張負荷を受けると、小さい外力で比較的大きな変形が発生する、すなわち内部構造が変化するという特徴を有している。内部構造が変化することによる、組物複合材料の物性への影響は大きいため、組物作製時や成形過程における組物に対する外力とその構造変化を定量化することは、最終製品の物性を予測するためには重要となる。そこで、第 2 章および第 3 章では、強化形態である組物の内部構造と力学的特性の関係について明らかにした。第 2 章では、組物の寸法設計に関する指針を得ることを目的として、引張条件下において変化する内部構造パラメータを定量的に明らかにした。繊維束に使用する材料および組角度が同じで、伸縮性が異なる 3 種類の組紐を用いて、引張荷重下における内部構造の変化および力学的特性を詳細に検討し、組紐の変形メカニズムを明らかにした。その結果、組紐の変形は、繊維束のうねり度合いを表すクリンプ率および繊維束内の繊維の体積含有率（繊維束内Ｖｆ）の変化量の関数で表される事が明らかとなった。

第 3 章では、引張荷重下における丸打組物の内部構造の変化、特に繊維束内の繊維体積含有率

の変化についてより詳細に観察を行った。その結果、同一繊維束内においてフィラメントの分布が存在し、繊維束同士が接触している領域周辺部において繊維束内 Vf が高いことが明らかとなった。これは、内部構造が不均質である事を示している。第 2 章および 3 章の結果より、複合材料成形前の組物の内部構造が明らかとなり、これらの知見は、複合材料の構造設計に有用であると考えられる。

第 4 章では、組物複合材料円筒の寸法設計、構造設計の基礎となる設計手順および作製手順について記述した。繊維束材料（フィラメント径、フィラメント数、繊維束内 Vf)を選択し、組物構造(組角度、組糸本数、中央糸本数)を決定し、部材の形状(内径および外径)を与えた際に、組物作製条件(組機の速度)および積層数を算出する手法について述べた。

第 5 章では、中央糸のない組物複合材料円筒の寸法設計指針を得ることを目的として、複合材料中の内部構造パラメータを定量化した。組物複合材料円筒を作製する場合、芯材となるマンドレルの直径によって内部構造パラメータのうち繊維束間距離が自動的に決定される。寸法予測解析モデルを用いて幾何学的構造を予測した結果、繊維束間距離が小さくなるにつれ、繊維束が厚さ方向に移動し、繊維束同士の重なりが生じることにより、厚さが決定することが明らかとなった。寸法予測解析モデルにより組物の内部構造が明らかとなり、内部構造パラメータを用いて組物の幾何学的配置（座標）が明らかとなった。これらの知見は、中央糸のない組物複合材料円筒の構造設計の指針となり得る。

第 6 章では、中央糸のない組物複合材料円筒の構造設計の指針を得ることを目的とした。組物複合材料円筒の力学的特性および破壊様相に及ぼす組角度の影響について、力学試験、断面観察、およびひずみ解析により検討した。その結果、組角度が異なる供試体の破壊挙動は大きく異なっており、ひずみ解析によりそのメカニズムが明らかとなった。

第 7 章、第 8 章では、組物複合材料に中央糸が挿入される事によって内部に生じる局所的な不均質性について述べている。本論文では、内部構造パラメータの局所的な不均質性をマクロな不均質性、繊維束内の局所的な繊維分布の偏りをミクロな不均質性と定義する。

第 7 章では中央糸を挿入する事により発生するマクロな不均質性とそれが物性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。第 5 章、第 6 章において得られた組物複合材料円筒の内部構造および力学的特性に関して、中央糸が挿入された場合について明らかとすることを目的として、力学試験、内部構造の定量化を行った。中央糸が挿入されることにより、内部構造パラメータの局所的な変化がどのように生じているかが明らかとなった。最終破壊形態は、組糸破壊ではなく、中央糸破壊が支配的であった。以上の知見により、中央糸を挿入した場合の寸法設計、構造設計の指針が得られた。

第 8 章では、第 7 章で示したマクロな不均質性だけでなく、繊維束内のフィラメント密度分布の違いにより現れるミクロな不均質性について検討した。断面観察により、中央糸の組糸と接触する領域において、繊維束内 Vf が局所的に高くなっており、中央糸内の繊維の分布が組糸の周期的な構造に合わせて周期的に変化することが明らかとなった。また、ミクロな不均質構造が力学的特性、特に中央糸のフィラメント破壊および強度に影響を及ぼすことが不均質性を考慮した有限要素法解析により明らかとなった。繊維束内のフィラメント分布が不均質な場合、繊維束内 Vf が低い部分で中央糸のフィラメント破壊が発生し、均質な場合と比較して強度が低下することがわかった。この結果から、繊維束内のフィラメント分布を制御することにより、初期の損傷を制

御することが出来ることが明らかとなった。

第 9 章では、組物複合材料の界面設計の検討を行った。これまで二次元的な境界として取り扱われてきた界面を、厚さや体積を有する界面相として取り扱い、微視的損傷の発生を抑制する事を目的として材料設計的な観点から複合材料全体の特性に及ぼす界面相の影響を検討した。界面相として、汎用樹脂と比較して高じん性、低弾性率を有する柔軟性樹脂を用いて、柔軟性界面相を組物複合材料に付与し、その力学的特性について検討を行った。その結果、柔軟性界面相が破壊の進展を遅延する効果があることがわかった。これにより、組物複合材料に対して、界面ハイブリッドが有効であり、破壊を遅延し破壊じん性を高め、より安全な組物複合材料の作製が可能になると思われる。

本論文では、内部構造パラメータを明らかとする事により、内部構造決定メカニズムが明らかとなった。これにより、組物複合材料円筒の設計指針が得られ、寸法設計、構造設計が可能となった。また、不均質性の制御による破壊の制御も可能となった。以上により、組物の特長を最大限に発揮した構造部材の作製が可能となり、用途の拡大が可能となると考えられる。

論文審査の結果の要旨

本論文では、組物複合材料円筒の寸法設計、構造設計に関する指針を示していることが大きな特徴である。組物は、他のテキスタイルとは全く異なり、構造を決定する 4 つのパラメータ(内部構造パラメータと呼ぶ)である繊維配向角度(組角度)、繊維束間距離、繊維束断面形状、繊維束断面積、がそれぞれ独立しているのではなく、相互に影響を及ぼしあうという複雑な内部構造を有しているため、これまで内部構造パラメータの定量化、相互関係の明確化はなされていなかったが、本論文において、初めて実現された。

組物の内部構造を詳細に観察し、定量化するだけでなく、内部構造の決定メカニズムを幾何学的に明らかとしている。次に組物複合材料円筒の力学的特性に関して、内部構造と関連づけることにより明らかとし、さらにその破壊のメカニズムについても詳細に検討している。中央糸を有する組物複合材料円筒に関しても同様に明らかとし、また、中央糸を挿入する事による内部構造の不均質性に関しても詳細に検討した。そして、不均質性が破壊に及ぼす影響について明らかとした。本論文により、組物複合材料の寸法設計、構造設計に関する指針が示された。以上により、組物複合材料円筒の特長を最大限に発揮した構造部材の作製が容易となり、用途拡大への一助になったことは工業的に意義深い。

本論文の内容は次の 9 報に報告されており、そのうち申請者を筆頭著者とするものは 8 報である。

1. Mechanical properties of f1at braided composite with flexible interphase
   Asami NAKAI, Akio OHTANI, Takeru OHKI, Toshiko OSADA, MasaharuWAMOTO, Hiroyuki HAMADA, Nobuo TAKEDA　Composite Interfaces,Vol.7,pp.399-410(2001)
2. Effect of Internal Structure on Mechanical Properties of Braided Composite Tubes
   Akio 0HTANI, Asami NAKAI
   Proceedings of 16th International Conference Composite Materials,Vol.1,

pp.580-581(2007)

3. Design of Braided Composite Pipes
   Akio OHTANI , Asami NAKAI, Hiroyuki HAMADA
   Proceeding of 10th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE-10)
   Poster Session-8,pp.1-6(2007)
4. Heterogeneity of the Internal Structure of Braided Composites
   Akio OHTANI, Yuki SASAKI, Yuka KOBAYASHI, Asami NAKAI, Hiroyuki HAMADA
   Design and manufacturing of Composite,Vol.7,pp.188-195(2008)
5. Deformation and Mechanical Properties of Traditional Braids Strings
   Akio OHTANI, Asami NAKAI, Hiroyuki HAMADA
   Textile Research Journa1(投稿中)
6. Investigation of the Heterogeneity for Tubular Braided Fabric under Tensile Loading
   Akio OHTANI, Asami NAKAI, Hiroyuki HAMADA
   Texile Research Journal(投稿中)
7. Investigation of Dimension for Internal Structure of Tubular Braided Composites
   Akio OHTANI,Asami NAKAI,Hiroyuki HAMADA
   Science and Engineering of Composite Materials(投稿中)
8. Bending Properties of Biaxial Tubular Braided Composites
   Akio OHTANI,Asami NAKAI,Hiroyuki HAMADA
   Science and Engineering of Composite Materials(投稿中)
9. Internal Structure and MechanicaI Properties of Tubular Braided Composite with Middle-end-fiber
   Akio OHTANI, Asami NAKAI, Hiroyuki HAMADA
   Composites Part A:Applied Science and Manufacturing(投稿中)

以上の結果より、本論文の内容は十分な新規性と独創性、さらに工業的な意義があり、博士論文として優秀であると審査員全員が認めた。